

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТРАНСФОРМАТОРОВ В СИСТЕМАХ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО ЭЛЕКТРОПОДОГРЕВА СТЕКЛОВАРЕННЫХ ПЕЧЕЙ

На основе принципов математического моделирования работы стекловаренных печей рассмотрен нагрев стекломассы системой дополнительного подогрева. По результатам моделирования распределения тепла сделан вывод об использовании трансформаторов в системах дополнительного электроподогрева в зависимости от их назначения.

Ключевые слова: стекловаренная печь, математическое моделирование, электроподогрев, трансформатор.

Electrical boosting system for glass heating is considered based on principles mathematical modeling of glass furnaces. According mathematical modeling results conclude principles of using transformers in electrical boosting system.

Keywords: glass furnace, mathematical modeling, electrical boosting, transformers.

Создание высокопроизводительной газозлектрической стекловаренной печи предполагает создание системы дополнительного электроподогрева (ДЭП) стекломассы [1]. Для определения параметров работы системы дополнительного электроподогрева (напряжение, плотность и сила тока между электродами) необходимо учесть как геометрические параметры ДЭП (расстояние между электродами, высоту электродов, диаметр), так и свойства расплава. Общее количество тепла, вводимое посредством ДЭП, составляет 5–15 % от общей тепловой мощности печи, причем доля электрической энергии в тепловом балансе ограничивается в первую очередь экономическими факторами [2].

Рассмотрим систему из трех одинаковых цилиндрических вертикально установленных электродов (рис. 1), расположенных в виде равно-стороннего треугольника и подключенных к источнику трехфазного тока.

$$Q = \sum_{i=1}^n P_i^{mp}, \quad (1)$$

где P_i^{mp} – мощность трансформатора, питающего i -ю группу электродов.

Далее необходимо вычислить мгновенные значения силы тока, текущего между электродами, для этого один полный период разбиваем на 6

частей и для каждой части путем сложения векторов определяем значение силы тока при соответствующем данному периоду времени разности потенциалов между электродами:

$$\vec{i}_{cb} = \vec{i}_a + \vec{i}_b, \quad (2)$$

где \vec{i}_{ab} – мгновенное значение силы тока между электродами a и b , А; \vec{i}_a – мгновенное значение силы тока в электроде a , А; \vec{i}_b – мгновенное значение силы тока в электроде b , А.

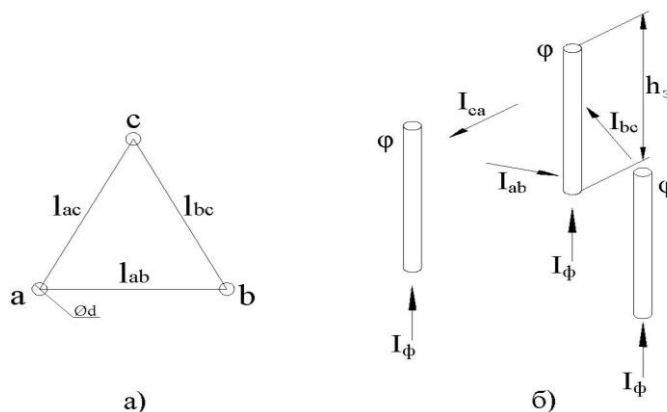


Рис. 1. Система ДЭП из трех электродов расположенных в виде равностороннего треугольника: a – вид сверху, b – схема расположения

Для каждой пары электродов рассчитываем величину тока, текущего между ними в определенный период времени. Предполагаем, что электрический ток течет по проводнику, длина которого – расстояние между электродами, площадь поперечного сечения данного проводника s . Площадь сечения s вычисляем исходя из параметров электрического тока проходящего через расплав между электродами, геометрических параметров системы ДЭП (расстояния между электродами, диаметра и высоты электродов), а также удельной проводимости расплава, являющейся функцией температуры.

Величину области прохождения тока находим исходя из закона Ома для участка цепи с учетом сопротивления стекломассы.

$$s = \frac{i_{ab} \rho_{cm} l_{ab}}{U_{\phi}},$$

где i_{ab} – ток между электродами, А; s – площадь сечения, м²; l_{ab} – расстояние между электродами, м; ρ_{cm} – удельное электрическое сопротивление стекломассы.

Из площади находим координату y , которая показывает размер зоны стекломассы, где проходит электрический ток:

$$\zeta = \frac{s}{h_3},$$

где h_3 – высота электрода, м; ζ – область течения электрического тока, м.

Для оценки изменения величины тепловыделения в расплаве разобьем полученную область на n проводников (рис. 1), величину удельного тепловыделения в каждом проводнике будем оценивать как:

$$q_i = J_i E, \quad (3)$$

где q_i – величина удельного тепловыделения в некоторой ячейке, В/м³;

$J_i = \frac{|\vec{i}_{ab}|}{s}$ – плотность тока в данной ячейке, А/м²; $E = \frac{U_\phi}{l_{ab}}$ – напряженность электрического поля (одинакова для всех ячеек), В/м.

Электроды, используемые в системах ДЭП, могут изготавливаться из различных материалов, для каждого материала существуют максимально допустимые нагрузки. Одним из самых распространенных материалов для электродов является молибден высокой чистоты при этом величина плотности тока на электроде не должна превышать 1 А/см². Для этого рассчитываем плотности тока исходя из площади поверхности электрода:

$$J = \frac{I_\phi}{\pi d_3 h_3},$$

где J – плотность тока на электроде, А/см²; d_3 – диаметр электрода, см.

Мощность тепла, выделяемого в расплаве не должно превышать общую мощность электрического тока подаваемого в расплав. Для проверки необходимо вычислить тепловыделение между всеми электродами за полный период:

$$P_0 = P_{12} + P_{23} + P_{34} \quad (4)$$

$$P_{12} + P_{23} + P_{34} = \sum_{i=1}^n k p_i V_i dT, \quad (5)$$

где P_{12} , P_{23} , P_{31} – тепловыделение между первым и вторым, вторым и третьим, первым и третьим электродами соответственно, Вт; k – коэффициент неравномерности нагрузки системы ДЭП; p_i – удельное тепловыделение i -й ячейки, Вт/м³; V_i – объем i -й ячейки, м³.

Рассчитаем удельное тепловыделение в расплаве при использовании системы ДЭП, состоящей из трех электродов: диаметр каждого $d_3 = 0,04$ м, высота электродов $h_3 = 1$ м, расстояние между электродами $l_{ab} = l_{bc} = l_{ac} = 1$ м, электропроводность стекломассы рассчитана для $t = 1151$ °С и составляет $\rho_{cm} = 0,10319$ Ом·см. Группа электродов подключена к трансформатору мощностью 100 кВА и номинальным напряжением $U_n = 230$ В. Расчеты величины зоны тепловыделения в зависимости от напряжения приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения удельного тепловыделения системы ДЭП при различном
номинальном напряжении трансформатора

Момент времени	Электроды	230 В		400 В	
		$q_{уд}, \text{Вт/м}^2$	Площадь, м^2	$q_{уд}, \text{Вт/м}^2$	Площадь, м^2
$t = 0$	1 и 2	1939,141	0,1113895	3372,42	0,0372
	2 и 3	0	0	0	0
	3 и 1	1939,141	0,1113895	3372,42	0,037

Анализируя данные табл. 2 можно отметить, что при высоком напряжении $U_n = 400 \text{ В}$ тепло выделяется более локально, т. е. на меньшей площади. Следовательно, подобный режим оправдан при использовании системы ДЭП в качестве теплового барьера, при необходимости нагрева больших площадей целесообразнее использовать трансформаторы с низким напряжением.

Список литературы

1. Дзюзер В. Я. Численная модель внешнего теплообмена в газозлектрической стекловаренной печи / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий, Е. Б. Садыков // Стекло и керамика. 2012. № 2. С. 8–13.
2. Дзюзер В. Я. Проектирование энергоэффективных стекловаренных печей / В. Я. Дзюзер, В. С. Швыдкий. М.: Теплотехник. 340 с.